

**В.И. КАЛАШНИКОВ**, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ"

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРА

Запропоновано ультразвуковий метод виміру швидкості й напрямку вітру, заснований на ефекті Доплера. Дано математичне обґрунтування методу. Отримано систему рівнянь для обчислення параметрів вітру. Приводяться похибки виміру. Мінімізоване вплив атмосферних умов на вимірювані параметри.

The ultrasonic method of measuring of speed and direction of wind, based on Doppler Effect, is offered. The mathematical ground of method is given. The system of equalizations is got for the calculation of parameters of wind. Errors of measuring are led. Influence of atmospheric terms on the measured parameters is minimized.

**Постановка проблемы и анализ литературы.** Во многих случаях, в частности, в сельском хозяйстве и спорте, применяющих малые летательные аппараты, очень важно знать и учитывать информацию о состоянии атмосферы. Наиболее существенными для малых летательных аппаратов являются скорость и направление ветра в данной точке и в данный момент. Поэтому в наборе измерительных приборов мобильного лагеря для управления полетами необходима портативная метеостанция, включающая, как минимум, измерители температуры, давления, скорости и направления ветра.

Традиционными системами измерения параметров ветра являются флюгеры. В них используются силы, возникающие при обтекании потоком газа поверхностей с разными аэродинамическими коэффициентами. Для объективного дистанционного измерения флюгеры снабжают различными преобразователями механических величин в электрические сигналы, которые удобно передавать по каналам связи в абонентские пункты визуализации, обработки и накопления. К известным системам такого типа можно отнести, например, анемометры, ветровые мониторы, погодные станции [1, 2]

Существенным недостатком механических измерителей, входящих в состав метеостанций, является их ненадежная работа, когда происходит изменение атмосферных параметров среды: температуры, давления, влажности воздуха и так далее [3]. Так, годовая эксплуатация современной автоматической беспроводной метеостанции [4] с механическими датчиками направления и скорости ветра показала, что всякие инверсные изменения воздушной среды почти всегда приводили к остановке крыльчатки из-за замерзания влаги на подвижных частях. И это при том, что прямое попадание осадков было исключено специальным навесом над винтом и флюгером.

Поэтому актуальным является построение датчиков направления и скорости ветра, которые не имели бы подвижных частей [5 – 7]. Наиболее перспективными разработками таких датчиков могут оказаться те, которые используют звуковые эффекты в движущейся газовой среде [7 – 10]. Примеры

использования ультразвуковых датчиков в метеостанциях есть [11]. Названная транспортируемая погодная станция укомплектована ультразвуковым датчиком направления и скорости ветра. Однако он входит в общий блок-контейнер, имеющий достаточно большие размеры и отдельно не предлагается. Кроме того, стоимость комплекта для названных выше потребителей мобильных систем слишком велика.

**Цель работы** – обосновать возможность построения измерителя направления и скорости ветра на основе эффекта Доплера, который лишен недостатков механических систем и удовлетворяет требованиям мобильности.

Для потребителей, названных в начале статьи, вполне достаточно для измерений ограничиться следующими диапазонами измеряемых величин: скорость ветра – 0 – 20 м/с с разрешением не хуже 0,5 м/с в температурном диапазоне от минус 20°C до +60°C и атмосферном давлении 380 – 760 мм.рт.ст.; направление ветра – 0 – 360° с разрешением не хуже 5°; размеры, определяющие объем, не более 1 дм<sup>3</sup>.

**Основа метода** – эффект Доплера, который определяет зависимость частоты воспринимаемого звука от скорости движения излучателя или приемника по отношению к среде. И наоборот, продольная акустическая волна заданной частоты, которая распространяется в движущейся среде, воспринимается неподвижным приемником как волна, имеющая другую частоту. При этом частицы движущейся среды совершают в ней колебания вокруг своего положения равновесия, периодически изменяя локальное давление. Фронт такой волны совпадает с фазовой скоростью звука в данной среде. Неподвижным приемником он воспринимается, как волна, которая приобретает фазовую скорость, равную геометрической сумме двух векторов: вектора скорости среды и вектора фазовой скорости звуковой волны в этой среде. Этот факт удобно использовать для одновременного определения как скорости, так и направления движения среды со звуковыми волнами.

**Конструктивная основа.** Точечный источник ультразвука излучает в пространство сферические волны, которые в движущейся воздушной среде расходятся концентрическими кругами из точки, которая фактически представляется движущимся излучателем. Три равноудаленных от излучателя неподвижных приемника, которые расположены на радиальных прямых, расходящихся под углами 120° относительно друг друга, принимают звуковые волны. Принимаемая ими частота будет определяться результирующим вектором скорости распространения звука в выбранном направлении, то есть геометрической суммой вектора фазовой скорости звуковой волны относительно воздушной среды и вектора скорости среды относительно неподвижного приемника.

Если теперь преобразовать измеренные частоты с трех приемников в числовые значения векторов скорости по трем направлениям, то их геометрическая сумма для неподвижной изотропной воздушной среды будет

равна нулю, а для движущейся воздушной среды – утроенной величине вектора скорости последней. Угол геометрической суммы векторов относительно выбранной системы координат определит направление движения воздушной среды, то есть направление ветра.

**Система уравнений для вычисления параметров.** Представим на комплексной плоскости три измеренных вектора, которые выходят из начала координат под углами  $120^\circ$  относительно друг друга. Базовое направление, по отношению к которому будет вычисляться угол направления ветра, совместим с вещественной осью комплексной системы координат. В конструктивном исполнении измерителя такое совмещение соответствует установке измерительного прибора на местности с ориентацией помеченного приемника ультразвука, например, на север.

$$\left\{ \begin{array}{l} \left| V_0 \cdot e^{i \cdot 0} + V \cdot e^{i \cdot \alpha} \right| - V_a = 0; \\ \left| V_0 \cdot e^{-i \cdot \frac{2}{3} \cdot \pi} + V \cdot e^{i \cdot \alpha} \right| - V_b = 0; \\ \left| V_0 \cdot e^{i \cdot \frac{2}{3} \cdot \pi} + V \cdot e^{i \cdot \alpha} \right| - V_c = 0, \end{array} \right.$$

где  $V_0, V, \alpha$  – соответственно неизвестные величины вектора скорости звука в неподвижной среде, вектора скорости движения среды и угла вектора скорости по отношению к выбранной ориентации измерителя;

$V_a, V_b, V_c$  – модули измеренных значений трех векторов, определяемых соответствующими покомпонентными геометрическими суммами:

$$\left\{ \begin{array}{l} (2V V_0 \cos \alpha + V^2 + V_0^2) - V_a^2 = 0; \\ (-V V_0 \cos \alpha - \sqrt{3} V V_0 \sin \alpha + V^2 + V_0^2) - V_b^2 = 0; \\ (-V V_0 \cos \alpha + \sqrt{3} V V_0 \sin \alpha + V^2 + V_0^2) - V_c^2 = 0. \end{array} \right.$$

Для итерационного решения систему удобно преобразовать, убрав из уравнений квадратные корни, определяющие модули векторов:

$$\left\{ \begin{array}{l} (2V V_0 \cos \alpha + V^2 + V_0^2) - V_a^2 = 0; \\ (-V V_0 \cos \alpha - \sqrt{3} V V_0 \sin \alpha + V^2 + V_0^2) - V_b^2 = 0; \\ (-V V_0 \cos \alpha + \sqrt{3} V V_0 \sin \alpha + V^2 + V_0^2) - V_c^2 = 0. \end{array} \right.$$

В заданном диапазоне измеряемых величин, когда  $V_0 \gg V \neq 0$  система всегда имеет решение. Вопрос лишь в том, с какой точностью необходимо измерять составляющие  $V_a, V_b, V_c$ . Если пороговое значение скорости ветра, с которого необходимо фиксировать измерения, принять равным 0,3 м/с, то при скорости звука 330 м/с относительная погрешность измерения составляющих, наверное, должна быть не больше 0,001.

**Оценка погрешности.** Так как каждое уравнение системы инвариантно относительно поворота системы координат, то для оценки погрешностей достаточно исследовать лишь одно уравнение, например, первое. Суммарное приращение функции  $f(V_0, V, \alpha, V_a) = 0$ , вызванное малыми изменениями ее аргументов, в первом приближении можно представить суммой слагаемых, каждое из которых равно произведению частной производной по аргументу на малое приращение этого аргумента:

$$\frac{\partial f}{\partial V_0} \Delta V_0 + \frac{\partial f}{\partial V} \Delta V + \frac{\partial f}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial f}{\partial V_a} \Delta V_a = 0.$$

После дифференцирования и преобразований это уравнение приводится к соотношению, связывающему относительные изменения аргументов:

$$((v \cos \alpha + v^2) \cdot \delta V + (1 + v \cos \alpha) \cdot \delta V_0 - (v \alpha \sin \alpha) \cdot \delta \alpha) \cdot \left( \frac{V_0}{V_a} \right)^2 = \delta V_a,$$

где  $\delta V, \delta V_0, \delta \alpha, \delta V_a$  – относительные изменения трех искомых параметров ветра и относительное изменение измеряемой компоненты  $V_a$ ;

$v = \frac{V}{V_0}$  – отношение модуля вектора скорости воздуха к модулю вектора

скорости звука в неподвижном воздухе.

Чтобы оценить величину допустимой погрешности  $\delta V_{a \text{ доп}}$  при измерении вектора  $V_a$ , необходимо относительные переменные заменить допустимыми погрешностями, например:  $\delta V_{\text{доп}} \approx 0,01$ ;  $\delta V_{0 \text{ доп}} \approx 0,001$ ;  $\delta \alpha_{\text{доп}} \approx 0,01$ , и потребовать в заданном диапазоне изменения переменных  $0 < v < 0,1$  и  $0 < \alpha < \pi$  выполнение неравенства:

$$((v \cos \alpha + v^2) \cdot \delta V_{\text{доп}} + (1 + v \cos \alpha) \cdot \delta V_{0 \text{ доп}} + (v \alpha \sin \alpha) \cdot \delta \alpha_{\text{доп}}) \cdot \left( \frac{V_0}{V_a} \right)^2 \geq \delta V_{a \text{ доп}}.$$

Минимальное значение левой части неравенства определяет предельную величину погрешности, с которой необходимо выполнять измерения скорости

звука по трем направлениям. Выражение в скобках на рис. 1 представлено в форме поверхности  $S(v, \alpha)$ , определяемой допустимыми вычислительными погрешностями. Квадрат отношения  $V_0$  к  $V_a$  может принимать крайние значения в интервале (0,8; 1,2) для  $v \approx 0,1$  и близок к единице при  $v \approx 0,01$ .

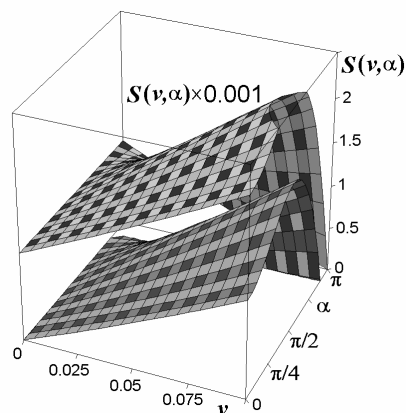


Рис. 1. Верхняя граница погрешности измерения

Рис. 1 показывает, что обеспечивать максимальную точность измерения (в пределах углов  $0 \leq \alpha < \pi/2$  относительно данного направления) необходимо лишь при измерении самых малых скоростей ветра ( $v \approx 0,01$ ). Полагая  $v$  равным нулю в выражении для  $S(v, \alpha)$ , получим  $\delta V_{0 \text{ доп}} \approx \delta V_{a \text{ доп}}$ . Другими словами, погрешность измерения определяется разрешающей способностью метода измерения частоты.

**Частота и метод ее измерения.** Чтобы продольные акустические волны оказались оторванными от излучателя и привязанными к движущейся воздушной среде, необходимо их длину выбрать во много раз меньше, чем базовое расстояние от излучателя до приемника. Желательно, чтобы волновой пакет насчитывал на этом расстоянии несколько десятков волн. Так, базу длиной в 5 см звуковая волна пробегает примерно за  $0,05/330 \approx 0,15 \cdot 10^{-3}$  с. Если выбрать источник ультразвука с частотой 400000 Гц, то в пределах базы будет двигаться  $\approx 60$  волн. Выбрав время измерения частоты  $t_{\text{изм}} = 0,015$  с, то есть в 100 раз больше времени прохождения базы, мы можем оценить нужный объем счетчика волн, равный  $\approx 6000$  единиц. Каждая единица счетчика будет определять приращение скорости ветра, равное  $330/6000 = 55 \cdot 10^{-3}$  м/(с·ед).

**Время накопления.** Это время измерения, которое определяет цену одной единицы в счетчике при стандартном состоянии атмосферы:

температуре – 15°C, давлении – 760 мм.рт.ст., скорости звука – 340,29 м/с.

Однако реальная скорость звука весьма существенно зависит:

от температуры –  $V_{\text{зв}}(T) \approx 0,5857 \cdot T + 331,11$ , ( $T$  в °C);

от давления –  $V_{\text{зв}}(p) \approx 0,04944 \cdot p + 302,9$ , (давление в мм.рт.ст.).

Этот факт вынуждает вводить необходимую коррекцию в величину времени накопления числа волн таким образом, чтобы цена единицы в счетчиках оставалась одной и той же. Для этих целей устройство определения параметров ветра должно включать в свой состав микросхемы, измеряющие температуру и давление. В первом приближении скорость звука при изменении температуры воздуха и давления можно вычислить по следующему разложению функции скорости в ряд Тейлора относительно точки  $(T_0, p_0)$ :

$$V_{\text{зв}}(T, p) = V_{\text{зв}}(T_0, p_0) + \frac{\partial V_{\text{зв}}(T_0, p_0)}{\partial T} \cdot (T - T_0) + \frac{\partial V_{\text{зв}}(T_0, p_0)}{\partial p} \cdot (p - p_0),$$

где  $T_0 = 15^\circ\text{C}$ ;  $p_0 = 760$  мм.рт.ст. – начальная точка стандартной атмосферы;

$T, p$  – реально измеренные значения температуры и давления;

$V_{\text{зв}}(T_0, p_0) = 340,29$  м/с – скорость звука в начальной точке.

После подстановки числовых значений частных производных получим:

$$V_{\text{зв}}(T, p) = 340,29 + 0,5857 \cdot (T - 15) + 0,04944 \cdot (p - 760).$$

Аналогичные коэффициенты линейной аппроксимации можно получить для сетки опорных значений  $(T_0, p_0)$  заранее, обеспечив большую точность вычисления скорости звука. Значение этой скорости необходимо использовать перед каждым измерением трех векторных компонент ветра, чтобы провести коррекцию времени накопления в соответствии с выражением:

$$t_{\text{изм}} = 100 \cdot \frac{\text{База}}{V_{\text{зв}}(T, p)} \quad (\text{с}).$$

**Результаты моделирования.** Решение системы из трех нелинейных алгебраических уравнений осуществлялось с помощью итерационного метода Ньютона. В качестве начальных приближений для искомых величин использовались следующие значения:  $V_0 = 1$ ;  $V = 0,1$ ;  $\alpha = \pi/4$ . В качестве числа волн, зарегистрированных счетчиками для трех направлений были взяты целые числа  $Va = 5941$ ,  $Vb = 5764$ ,  $Vc = 5823$ . Чтобы продемонстрировать независимость результатов решения системы от порядка числовых значений, итерации выполнялись для следующих порядков чисел исходных данных:

$$Vabc = [Va, Vb, Vc] = [5,941, 5,764, 5,823];$$

$$V_{abc} = [V_a, V_b, V_c] = [0,5941, 0,5764, 0,5823].$$

Результаты решения оказались пропорциональными, но равными по углу:

$$V = [V, V_0, \alpha] = [0,034775, 5,84219, -18,8923^\circ].$$

$$V = [V, V_0, \alpha] = [0,0034775, 0,584219, -18.8923^\circ].$$

Значения первого решения в двух масштабах представлены на рис. 2 в виде векторов на комплексной плоскости. На ней вектор  $V_0a$  совмещен с вещественной осью. Вектор скорости ветра в обоих случаях один и тот же.

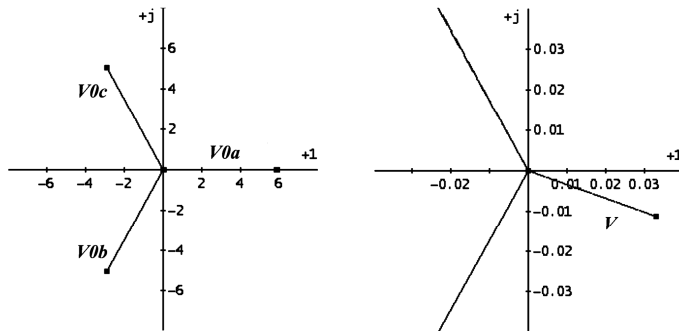


Рис. 2. Результаты решения системы уравнений

**Выводы.** В результате выполненной работы получены уравнения, позволяющие по результатам измерения частоты тремя приемниками вычислить параметры ветра: скорость и направление. Оценена погрешность вычислений. Получены формулы для коррекции результатов измерения в зависимости от изменения температуры воздуха и атмосферного давления.

**Список литературы:** 1. Анемометры SKYWATCH. – <http://www.anemometer.ru/>. 2. Ветровые мониторы Coastal Environmental Systems. – [www.unicom.ru/Info/METEO/COASTAL/sl104.htm](http://www.unicom.ru/Info/METEO/COASTAL/sl104.htm). 3. Бернгардт Р.П. Актуальные аспекты интерпретации ветровых и гололедных нагрузок в Сахалинской области. – [www.SCIENCE.sakhalin.ru/Geography/2001/16/Index.html](http://www.SCIENCE.sakhalin.ru/Geography/2001/16/Index.html). 4. Oregon Scientific WMR968 Cable Free Complete Weather Station. – <http://www.amazon.com/Oregon-Scientific-WMR968-Complete-Weather/dp/B00005B0BL>. 5. Шкундин С.З., Кремлёва О.А., Иванников А.Л. Состояние и перспективы развития анемометрии в угольной промышленности. – [http://www.sirsensor.ru/art\\_3.html](http://www.sirsensor.ru/art_3.html). 6. Громов Г.В., Озеров А.В., Шафрановский М.Н. Методы бесконтактного измерения расхода жидкости в напорных и безнапорных трубопроводах. – [www.signur.ru/4-8.pdf](http://www.signur.ru/4-8.pdf). 7. Блохинцев Д.И. Акустика неоднородной движущейся среды. – М.: Наука, 1981. – 206 с. 8. Снектор С.А. Электрические измерения физических величин: Методы измерений: Учеб. пособие для вузов. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 320 с. 9. Акустика движущихся сред. (Phys.Web.Ru) <http://nature.web.ru/db/msg.html?mid=1167660>. 10. Козелов В.П. Об использовании эффекта Доплера для оценки скорости ветра в термосфере. Некоторые методические проблемы. – [http://pgi.kolasc.net.ru/seminar/archive/2003/Abstracts/5\\_Ionosphere/Kozelov\\_V.pdf](http://pgi.kolasc.net.ru/seminar/archive/2003/Abstracts/5_Ionosphere/Kozelov_V.pdf). 11. Orion Weather Station Systems – [http://www.columbiaweather.comOrion\\_Weather\\_Station.html](http://www.columbiaweather.comOrion_Weather_Station.html)

Поступила в редакцию 21.11.2006

УДК 621.394.4:615.472.05

А.Р. КОРСУНОВ, канд. техн. наук, УИПА (г. Харьков)

## ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЭОПЛЕТИЗМОГРАММ И СФИГМОГРАММ ДЛЯ БАЗЫ ДАННЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ КОМПЛЕКСА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА БИОСТРУКТУРЫ

У статті наведені результати досліджень з методичного обґрунтування інтегративного неінвазивного засобу контролю у ході моніторингу функціонального стану біооб'єкту, на який впливає електромагнітне опромінення. Вирішується задача про числове відображення одержуваних даних з метою їх розміщення в базі даних телекомунікаційної системи апаратної платформи відповідних комплексів.

This paper analyses results of construction of digital pletismogram models for placing in the base of the facts in telecommunication system, as mode of check of function condition of the bioobject, which radiations electromagnetic field.

**Введение.** Измерение, считывание и передача информации с диагностического стенда комплекса электромагнитного воздействия на биоструктуры (КЭМВБ) в базу данных требует специальной алгоритмической разработки.

**Постановка проблемы.** Для оперативного наблюдения за результатами воздействия на биообъекты и управления интенсивностью влияния электромагнитных сигналов на него целесообразным является использование неинвазивных методов контроля биомедицинских параметров, которые позволяют контролировать изменение физиологических показателей объекта перед началом и в процессе электромагнитного влияния [1]. Анализ информативных сигналов и физиологических показателей, например, организма человека позволяет сделать вывод, что для реализации биологической обратной связи неинвазивными средствами наиболее информативными являются реографические показатели [2]. В связи с этим необходимо решить проблему, связанную с достоверностью и надежностью результатов контроля, при их сопоставимости и многократной повторяемости.

**Анализ литературы.** Длительное время считалось, что искусственно созданные физические факторы имеют неспецифическое действие и повышают общую реактивность организмов, активизируя его активные силы [3]. Тем не менее исследования показали, что наряду с неспецифическими искусственные факторы имеют действия, свойственные лишь каждому из них [4].

Электропроводимость тканей и органов существенно зависит от их функционального состояния и, следовательно, может быть использована как объективный контрольный параметр о влиянии внешнего воздействия на